技術解説

ディーゼルエンジンにおける筒内水噴射を用いたNOx低減ストラテジー(第1報) -中・低負荷での筒内水成層コンセプトの提案-NOx Reduction Strategy Using Direct Water Injection in a Diesel Engine (First Report)

河合 謹 ^{*1}	薄井 陽 *1	稻垣 和久 ^{*2}	近藤 照明	² 西川一明 ^{*2}
Tsutomu kawae	Yo Usui	Kazuhisa Inagaki	Teruaki Kondo	Kazuaki Nishikawa

*1 エンジン事業部技術部 *2 豊田中央研究所

エンジンのシリンダ内に水を成層配置することで、NOxの大幅な削減を実現する燃焼コンセプトを提案する。 要 旨 3D-CFD解析を通じて、ピストンのキャビティの上部周辺に水を層状に配置すると、シリンダ内に均一に分散させた場 合に比べ、NOxの低減率が大幅に向上することが分かった。このような水の成層配置を実現するために、多孔式ノズル を開発し、エンジンヘッドに水を筒内直噴できるシステムを用いた。IMEPが0.8MPaの実験結果では、水噴射の質量が 燃料質量の50%を占める条件下で、水噴射のタイミングを最適化することにより約40%のNOx削減を達成した。さら に、水噴射を2段階に分けることで、スートの50%減少を実現した。これらの条件下で排気ガス再循環(EGR)を適用し、 同等のスート濃度で測定したところ、水噴射を使用しない場合と比較して最大で75%のNOX削減が見られた。

キーワード:エンジン、圧縮時着火、燃費、エミッション

Abstract

We propose a combustion concept for significant NOx reduction by stratifying water within the engine cylinder. Through 3D-CFD analysis, we found that stratifying water around the upper region of the piston cavity results in much higher NOx reduction compared to homogeneously distribution water in the cylinder. To achieve this stratified water distribution, we developed a multi-hole fan nozzle and installed it on the engine head to establish a system for direct water injection into the cylinder. Experimental results at an IMEP of 0.8MPa showed that under conditions where the mass od water injection accounted for 50% of the fuel mass, optimizing the timing of water injection led to an approximately 40% reduction in NOx. Furthermore, diving the water injection into two stages resulted in a 50% reduction in soot. When applying Exhausted Gas Recirculation (EGR) under these conditions with equivalent soot concentrations, we observed up to a 75% reduction in NOx compared to no using water injection.

Keywords: Engine, Compression ignition engine, duel economy, emission gas

1 まえがき

CN(カーボンニュートラル)に向けて、水素、ア ンモニア、e-fuel、バイオ系燃料など、非在来型の CN燃料を用いた内燃機関からのアプローチが注 目されている。一方、空気を酸化剤に用いた燃焼で 筒内ガスを高温化して圧力に変換し動力を得る、 という原理を用いる限りは、燃料種にかかわらず NOx(窒素酸化物)の生成は回避できず、CO₂フ リーをCN燃料で実現できる場合でも、NOx低減 が内燃機関の生き残りの必須条件となる。

燃焼側からNOx低減アプローチのひとつとし て、水噴射は効果的でこれまでに多くの研究があ る^{[1][2]}。また、近年では火花点火エンジンを対象 に、排気ガスから水を回収するシステムが提案さ れており^[3]、これをディーゼルエンジンに適用す れば、水充填の手間なくNOx低減が可能となり、 実用性が高いシステムとなり得る。

3原子分子であるH2Oを筒内に導入する水噴射 では、熱効率の悪化を伴うため添加は少量が望ま しく、このときNOx低減の効率がポイントにな る。そこで本研究では、水を筒内に成層配置させる ことでNOx低減効果を高めるコンセプトを提案 し、その性能を実機で検証したので報告する。

2 筒内水成層コンセプト

Takasaki^[1]らは、舶用ディーゼル機関を対象 に、水噴射手段として燃料噴射弁の内部の燃料油 通路中に水と燃料油のそれぞれが毎回層状に配置 されその状態のまま筒内に噴射されるデバイスを 用いる層状水噴射コンセプトを提案した。層状水 噴射では、高温の燃焼領域に水を配置できるため、 効果的にNOxが低減できる反面、噴射弁の内部構 造が複雑になるため、信頼性が課題となる。これに 関連し、実用性を鑑みた別体の水噴射弁を用いた 検討では、燃焼に関与しない水が存在するために、 層状水噴射に比べてNOx低減効果が半減するこ とが、田山ら^[2]によって報告されている。

本章では、別体の水噴射弁を用いる方法を想

定し、NOx低減効果のポテンシャルが高い水 の筒内成層配置をまず明らかにした。この検 討は、(株)豊田中央研究所で開発した3D-CFD (Computational Fluid Dynamics)^[4] に燃料 の噴霧モデルと同様の水噴霧モデルを追加して 実施した。計算条件を表1に、検討した2ケース のキャビティ内の水分布を図1にそれぞれ示す。 平均有効 EIMEP (Indicated Mean Effective Pressure) 0.8MPaの負荷を対象にし、燃料量に対 する水の質量比を水率と定義し、水率は50%とし た。原理検討のため、水分布は軸対象として、液相 の水を-5° ATDC (After Top Dead Center) に おいて図1に示すそれぞれの領域内に全量を均一 に配置したのち、水は瞬時に蒸発する、という簡素 な仮定を用いた。なお、CFDで用いた燃焼やNOx 生成のモデルは文献^[4]と同じ、エンジン諸元、燃 料噴射条件など、詳細条件は3.3節に記載したも のと同じである。Case1は均質に水を分布させた 場合、Case2は燃料の通り道であるキャビティ内 の上部に水を集中的に配置させた場合で、水の総 量は同じである。

表1 計算条件 Table 1 Calculation Conditions

IMEP[MPa]	0.8
Injected water ratio[%]	50
Water temperature[°C]	80
Injection timing of water[°ATDC]	-5



Fig.1 Examined Water Distributions in Piston Cavity

Case1、2に対し、水を供給しないベースの NOx排出量で正規化したNOx比を図2に比較す る。キャビティ内の上部に水を成層配置すると、均

質配置するよりもNOx比は低下し、低減率は15 ポイント向上することが分かった。



図2 NOx比の比較

Fig.2 Comparison of NOx Ratio between Two Cases

供給された水から生成した水蒸気の質量分率を 図3に示す。なお、水蒸気は燃料の酸化反応によっ ても生成されるので、これを排除するために図3 は燃焼計算を実施しない条件で計算した結果であ る。破線は噴霧の外形線で、当量比が0.1の等高線 を示す。図3からCase2の成層配置では、噴霧が周 囲ガスを巻き込んで発達するため、燃料噴射軸に 沿ったキャビティ内の上部に集中して水を分布 させた方が、燃焼時に高温となる噴霧領域により 多くの水をエントレインでき、NOx低減率が向上 することが分かった。以上から、本研究では図1の Case2で示したような水のキャビティ内上下成 層の具現化を目指した。



図3 10° ATDCにおける水分布(破線:噴霧外形) Fig.3 H₂O Distributions at 10° ATDC (Dash: Spray)

3 方法

3.1 水の筒内成層の具現化手法

水を成層化するためには、時間的な水の分散を 回避する観点から、噴射時期は早期よりも圧縮行 程の後期が望ましい。一方、圧縮行程後期では筒内 ガス密度が高くなるため、キャビティ内上部の全 周に水を分布させるという観点から、水噴霧には ある程度の貫徹力と広がりが必要になる。また、噴 霧外観の要求特性として、上面視にてキャビティ

全体に扁平な扇型の形状が望ましい。以上から、目 指すべき水噴霧のイメージは図4のようになる。 このような噴霧の具現化のため、本研究では多噴 孔型ノズルを用い、同一平面上で各孔からの噴霧 を扇状に並べて配置する形態とした。筒内直接噴 射式ガソリンエンジンで実用化されている多噴孔 型のノズルをベースに、表2に示すような諸元の 噴射弁を試作した。



図4 水噴射用扇状噴霧型ノズル Fig.4 Fan Spray Type Nozzle used for Water Injection

表2 水噴射用ノズル仕様と主要寸法 Table 2 Specifications of Water Nozzle and Dimension related to Nozzle Layout

Hole diameter[mm]×number	0.2×5
Spread angle of fan sprays α [deg]	54
Spray direction β [deg]	74
Nozzle offset length L offset [mm]	40.3

図5に水噴射弁のエンジンへの搭載レイアウト を示す。吸気弁と排気弁の間隙、すなわちシリンダ 中心からオフセットした位置(ノズル先端のオフ セット長:Loffset)に挿入して、シリンダ上部に水を配 置させるため、垂直面の噴射方向βはできるだけ大 きくなるように噴射弁を傾斜させた(表2)。

水噴射システムを図6に示す。理研機器(株) 製の水用電動ポンプ(WSMP-3014B)を用いて 水を昇圧し、減圧弁とリリーフ弁にて、噴射圧を 20.5MPaに調整した。噴射時期、噴射期間はエ ンジンのクランク角と同期したTTL(Transistor Transistor Logic)信号をPCによって作成し、 EDU(Electric Drive Unit)で生成した電流に よってノズル内の電磁弁を介してニードルリフト を制御した。また、水噴射量は(株)キーエンス製の クランプオン式流量センサ(FD-XS8)によって測 定した。



図5 水噴射用ノズルレイアウト Fig.5 Layout of Water Nozzle Installation



Fig.6 Water Injection System

3.2 エンジン実験条件

エンジン諸元、評価した運転条件、水噴射条件 を表3、4、5にそれぞれ示す。運転負荷は中・低負 荷のIMEP0.8MPa(軽油噴射量30.0mg/st)と し、パイロット噴射3回、メイン噴射1回の合計4 回噴射である。水噴射量は燃料量に対して質量 ベースで50%の15.0mg/stに固定した。水噴射 圧は20.5MPaで、噴射時期は圧縮行程後期でパ ラメータとして変化させた。水噴射の回数は1回 をベースとし、2回の分割噴射の効果も評価し た。排気ガス分析は(株)堀場製作所製のMEXA-1600DEGR、スモークはAVL415Sを用いて測定 した。

表3 エンジ	ン諸元			
Table 3 S	pecifications	of	Engine	Hardware

Bore×stroke[mm]	92×103.6
Compression ratio	15.6
Nozzle dia.[mm]×num.	0.111×9
Nozzle cone angle[deg]	155

表4 運転条件	
Table 4 Operation Conditions	5

Engine speed[rpm]	2000
Target IMEP[MPa]	0.8
Fuel quantity[mg/st]	30.0
Boost press.(abs)[MPa]	0.1
Fuel injection pressure[MPa]	120
Main injection timing[°ATDC]	-3.3
EGR ratio[%]	0 to 20

表5 水噴射条件

able 5	vvaler	Injection	Conditions	

Water quantity[mg/st]	15.0
Water injection pressure[MPa]	20.5
Water injection timing[°ATDC]	Parameter
Number of injections	Single or Double

3.3 水噴霧の可視化と3D-CFDシミュレーション

意図した噴霧形状になっていることを確認する ため、定容容器を用いて水噴霧の観察を行った。 実験装置を図7に示す。文献^[5]と同じ装置を用い、 shadowgraphによって可視化した。



図7 水噴霧可視化装置 Fig.7 Optical Setup to observe Water Spray[5]

表6 水噴霧可視化条件

Table 6 Conditions for Water Spray Visualization

Ambient gas component	CO ₂ (pure)
Ambient gas density[kg/m ³]	17.1
Ambient gas temperature[K]	296K
Water injection pressure[MPa]	20.5

実験条件を表6に示す。定容容器に分子量の大きいCO2ガスを充填することで圧縮行程後期の雰囲気密度場を再現した。

またエンジン実験に加えて、3D-CFD^[4]による 解析を実施した。CFDに用いたサブモデルの詳細 はここでは割愛するが、本研究では燃料に噴霧モ デルと同様の水噴霧のモデルを新たに導入した。 次章で述べるように、前記の可視化観察結果と比 較することで、まず水噴霧の外観形状、ペネトレー ションの再現性を検証したのち、エンジン筒内の 解析に適用した。

4 結果

4.1 水噴霧の可視化と3D-CFDでの再現性

水噴霧を定容容器で可視化した結果を図8左 に示す。噴霧の広がり角は設計値と同等の54°に なっており、圧縮行程後期を想定した高密度場に おいても、噴霧の広がりに関して縮退が起きてい ないことを確認した。また、CFDによって、同実験 条件で水噴霧計算した結果(図8右)と噴霧形状を 比較したところ、可視化結果とよく一致している ことを確認した。さらに、水噴霧のペネトレーショ ン(噴孔位置から中央軸上の噴霧先端までの距離) を図9に比較した結果、よく対応していることが 分かった。



図8 定容容器での水噴霧の可視化結果(左)と計算結果(右) Fig.8 Visualized Water Spray in a Vessel (Shadowgraph, Left) and Simulated Result (Right)



Fig.9 Comparison of Water Spray Penetration

4.2 成層水噴射コンセプトの基本特性

水噴射時期の変化に対し、水噴射しないベース で正規化したNOx比、スート比の実測をそれぞれ 図10、図11に示す。噴射時期を遅角側から進角す ると、NOx比が小さく、すなわち低減率が大きく なり、スート比は増加する、トレードオフの関係 にあることが分かった。最適な水噴射時期は-45° ATDC付近で、このとき、NOx低減率、スート低減 率は、それぞれおおよそ40%、10%である。

次に、水噴射がないベースと、水噴射時期を変化 させたときの熱発生率の実測を図12に示す。いず れの水噴射条件でも、パイロット燃料の熱発生率 が遅延し、メイン燃料の熱発生率と重畳するため、 ベースと比較してピーク値が増加した。また、水噴 射時期によって、パイロット燃料の発熱時期が変 化し、メインの熱発生率もこの影響を受けて若干 変化した。



Fig.10 NOx Ratio vs Water Injection Timing





Fig.12 Comparison of Heat Release Rates

水噴射時期が-30、-45°ATDCの2条件に対し、 水分布を計算した結果を図13に示す。なお、燃焼 によって生成する水分を排除するため、図13は燃 料噴射がない条件で計算した。スワール流は反時 計回りに回転し、水噴射弁の先端は水色の円に位 置し、図の左方向に噴射される。なお、図中の黒点 は未蒸発の水液滴群である。図13は軽油のメイン 噴射直前に相当する-5°ATDCでの水分布を示す が、水噴射時期が遅角側の-30°ATDCでは-45° ATDCと比べて、水分布は狭い領域に集中してい る。これは噴射時期遅延化によって水が分散する 時間が短いことと、噴射時期が遅いほど筒内ガス 密度が高くなって水噴霧の貫徹力が弱くなるため である。一方、-45°ATDC噴射では、相対的に筒内 ガスが低密度で、かつ分散する時間が長くなるた め、水が広い領域に分布するようになる。



Fig.13 Top View of H₂O Mass Fraction at -5° ATDC

ヘッド下面より3.3mm下の断面におけるメイ ン噴霧の着火時期近傍でのガス温度分布を図14 に示す。水噴射によって、水噴射がないベースより 高温度領域は小さくなるが、水がより広い領域に 分布する-45°ATDC噴射の方が、低温化する領域 が広がる傾向にある。図10で示したような噴射時 期の進角でNOx低減率が高くなる傾向は、このた めであると推察される。



図14 上死点におけるガス温度の上面視 Fig.14 Top View of Gas Temperature at TDC

次に、背反として図11に示すように水噴射時期 が進角するほどスートが増加する要因を考察す る。噴孔出口から噴霧の着火位置の距離をリフト オフ長、あるいはセットオフ長(Lsetoff)と呼び、こ れが長いほどスートの生成が抑制されることが Siebersらによって報告されている^[6]。すなわち、 噴孔近傍では燃料過濃領域になっているため、着 火位置は噴孔出口から遠いほど、スートは抑制さ れる。この現象と照らし合わせると、水噴射時期が 遅角するほど、水は噴孔近傍に集中するため、冷却 効果で着火位置が噴孔から遠くなる(図14上と左 下の比較)が、噴射時期が進角すると、水はより広 い領域に分布するので、着火位置が下流に移動す る効果は全般的に弱くなる(図14左下と右下の比 較)。これに加えて図13に示すように噴射時期の 進角化で、水の買徹力が過大になって水分布が水 噴射弁の位置と反対の左側に偏り、右半分でLsetoff が長大化する効果が小さくなるため、スート低減 効果は低下する。さらに進角すると、Lsetoffの長大 化よりもガス温度の低下によるスート酸化速度低 下の影響が上まわるようになり、図11に示すよう

ディーゼルエンジンにおける筒内水噴射を用いたNOx低減ストラテジー(第1報)

にスート比は1を超えるようになる。

4.3 水の分割噴射の効果

水噴射を2回に分割して、水噴霧の過度な分散 を抑制し、かつ水分布の偏りを軽減することで、一 層のエミッション低減の可能性を検討した。分割 噴射では、噴射時期はそれぞれ-45、-20°ATDC、 水量の分割比は2:1で水の総噴射量は同じとし た。水分割の有無に対し、水噴射がないベースで正 規化したNOx比とスート比の実測を図15に、こ のときの熱発生率を図16にそれぞれ示す。水を分 割噴射しても熱発生率はほとんど変化しない一方 で、スートは半減し、NOx-スートのトレードオフ が大幅に改善することが実験で明らかになった。



図15 水噴射の分割噴射による効果 NOx(左)スート(右) Fig.15 Effect of Split of Water Injection on NOx (left) and Soot (right)



Fig.16 Effect of Split of Water Injection on Heat Release Rate

次に、水分割の有無に対して、水分布をCFDに よって計算した結果を図17に比較する。単噴射 (左図)では左半面に水が偏るが、分割化(右図)で 後半に噴射される水噴霧が右半面に滞留するので 偏りは軽減する。縦断面の分布では、噴射弁の搭載 上の制約から噴射方向は水平より下方になるた め、単噴射では噴射弁と反対側(B-B断面の左側) でキャビティの下部に水が分布する傾向にある。 しかし、分割化で噴霧貫徹力が低下するのでこの 傾向は緩和される。オフセット配置の噴射弁のた め、理想的な軸対称分布にはならないが、水の分割 噴射によって燃料噴霧の通り道に水を配置すると いうコンセプトの理念は具現化できている、と考 えられる。

水分割噴射によるガスの温度分布への影響を CFDで計算した結果を図18に示す。水の分割化 によって、噴孔まわりの燃焼室中央付近の温度が 全周にわたって低下しており、Lsetoffは水噴射がな いベースと比較して、ほとんどの噴霧で長くなっ ていることが分かる。以上から、狙いどおり、分割 噴射によって水分布の過度な分散を抑制し、偏り が少なく水を成層配置できたため、エミッション 性能が改善したと考えられる。







図18 分割噴射によるガス温度への影響(TDC、ヘッド下面3.3mm断面) Fig.18 Effect of Split of Water Injection (TDC, Cross Section 3.3mm below Cylinder Head)

次に水噴射(分割あり)にEGR(Exhausted Gas Recirculation) を組み合わせて、NOx-スートの トレードオフを測定した結果を図19に示す。水 噴射によるスート低減効果によって、水噴射がな いベースより、高いEGR率の適用が可能になり、 スートが2.3FSN (Filter Smoke Number)の条 件にてNOxは1/4に低下した。

最後に、NOxと図示熱効率の実測を図20に比 較する。等NOxの条件においては水噴射がない 場合と比べて図示熱効率の悪化は0.4ポイント程 度である。水噴射によってガス温度が低下して熱 損失が低下する効果があり、水噴射割合が50%程 度であれば、熱効率の悪化は軽微であることが分 かった。







Fig.20 NOx versus Indicated Thermal Efficiency

5 まとめ

水を筒内に成層配置させてNOxを大幅に低減 するコンセプトを提案し、実機性能を検証した。以 下に結果を示す。

- (1) 燃料噴射軸に沿ったキャビティ内上部に水を 成層配置する方が、均質よりNOx低減効果が 高いことをCFDで見出した。
- (2)水分布の筒内成層化はNOxだけでなくスート を低減する効果があり、燃料に対する水の質 量割合が50%の場合、水噴射がない場合より も、等スート条件でNOxは1/4に低下した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、(株)豊田中央研究所 堀田義博様、脇坂佳史様、中川浩和様、井戸田芳典 様に多大なご協力を賜りました。ここに謝意を表 します。

開発の経緯と開発者の思い

エンジン事業部ビジョンである「人と社会、地球環境のためになるエンジンを創ろう」を実現するため、今 後のカーボンニュートラル社会において、クリーンな燃料で動く、よりクリーンなエンジンを追求するた め開発しました。エンジン筒内に水を層状に直接噴射するという奇想天外なコンセプトは(株)豊田中央研 究所の稲垣和久氏によるもので、このコンセプトが本当に効果があるものなのかを探るべく、何度も数値シ ミュレーションを繰り返しました。また実際にエンジン実機での検証においても、水を噴射させるインジェ クタを既存のエンジンに取り付ける際にも苦労があり、エンジンの信頼性を損なわずにインジェクタを最 適な位置・方向となるよう何度も検討を行いました。 今後も暮らしにエンジンの力が必要な人々のため、エンジンを創り続けるため、今後も開発を続けていき たいと思います。

ディーゼルエンジンにおける筒内水噴射を用いたNOx低減ストラテジー(第1報)

■参考文献

- [1]Koji Takasaki et al., "Improvement of Diesel Combustion Using a Fuel-Water-Fuel Injection System", Trans. Jpn. Soc. Mech Eng., Vol.63, No.613, B, p.3165-3172 (1997)
- [2]田山経二郎 他,"水添加燃焼によるディーゼル機関の低 NOx化研究".日本機械学会論文集(B編) 61巻590号. No.95-0236 (1995-10)
- [3] Guillaume Hebert, "Exhaust Gas Condensate as an Enabler for Self-Contained Water Injection Systems", 28th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, p.1081-1101 (2019)
- [4] 稲垣和久 他, "ディーゼル機関の無煙低温燃焼法 第2報 数 値解析によるメカニズムの解明",自技会論文集,vol.34. p.71-76 (2003)
- [5]河村清美他,"キャビテーション気泡混合噴射法による微 粒化メカニズムと噴霧特性",日本機械学会論文集(B編) 78巻793号 (2012)
- [6] Dennis Siebers et al., "Flame Lift-Off on Direct-Injection Diesel Sprays Under Quiescent Conditions", SAE 2001-01-0530 (2001)

■著者紹介■



河合 謹

西川 —明





稲恒 和々



沂藤